

무선 광통신 기반 저궤도 위성 간 통신 성능 분석

임 병 주^{*}, 고 영 채[°]

Performance Analysis of FSO Communication for LEO Satellite with Inter-Satellite Link

Byungju Lim^{*}, Young-Chai Ko[°]

요 약

본 논문에서는 저궤도 위성에서 무선 광통신 기반 위성 간 통신을 활용하였을 때 종단 간 사용자들의 아웃타이저 확률 및 종단간 지연 시간을 분석하고자 한다. 특히 다중홉 위성 시스템이 종단간 성능에 미치는 영향을 분석하였으며, 시뮬레이션을 통해 FSO 기반 ISL의 우수성을 보여주고, RF 기반의 ISL과 비교하여 무선 광통신이 얻을 수 있는 이점들에 대해서 논의하고자 한다.

Key Words : FSO, LEO satellite, inter-satellite link, Multi-hop ISL

ABSTRACT

In LEO satellite network, inter-satellite link (ISL) can enhance network performance and reduce end-to-end latency. In this paper, we analyze the outage probability and end-to-end latency of LEO satellite network with FSO-based ISL. Especially, we demonstrate the effect of FSO-based ISL in multi-hop LEO satellite network. We compare FSO-based ISL with RF-based ISL, and discuss which one is more suitable for ISL implementation.

I. 서 론

저궤도 위성을 활용한 통신 서비스 제공은 다양한 기업들에서 활발히 연구가 되고 있고, 실제 상용 서비스를 제공하고 있다. 특히 SpaceX의 스타링크는 수 많은 저궤도 위성을 배치함으로써 지구의 음영지역 없는 서비스 제공을 목표로 하고 있다. 위성 통신 네트워크를 구축할 때, inter-satellite link (ISL)은 중요한 기술 중 하나이며 ISL을 활용하여 네트워크 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있으며^[1], 스타링크는 무선 광통신 기반의 ISL을 적용하여 위성 통신 성능을 향상시키고 커버리지를 확대시키고자 한다^[2].

무선 광통신의 성능은 대기기에 민감한 영향을 받지만 ISL에서 무선 광통신을 활용하게 되면 대기의 영향이 미비하므로 안정적인 통신이 가능해진다. 또한 무선 광통신의 적진성으로 인하여 RF 대비 빔 발산이 현저히 작아지므로 장거리 통신이 가능해지며 ISL에 적합한 통신 방식으로 각광받고 있다^[3]. 이러한 무선 광통신은 unmanned aerial vehicle (UAV) 혹은 high altitude platforms (HAPS) 등에 활용하는 연구가 진행되었다^[4,5]. 위성과 UAV 간의 링크를 무선 광통신으로 고려하여 성능을 향상시키는 연구가 진행되었으며^[4], HAPS 와 지상 기지국간의 백홀 링크를 무선 광통신으로 설계하여 HAPS의 최적 배치 및 전송 파워 등을 최적화하는 연구가 진행되었다^[5]. 하지만 통신 거리가 증가할수록 무선 광통신의 빛이 퍼지는 현상으로 인해 전송 손실이 커지게 되므로 다중홉 릴레이 기술을 통하여 무선 광통신에서 발생하는 손실을 최소화하여야 하지만 위 연구들은 다중홉에 따른 무선 광통신의 성능을 분석하지 않았다.

본 논문에서는 무선 광통신을 활용한 ISL의 성능을 분석하고 다중홉 위성 네트워크에서 ISL이 미치는 영향을 분석하고자 한다. 특히 종단 간 아웃타이저 확률 및 지연 시간을 분석하여 RF 기반 ISL 대비 FSO의 장단점을 보여주고자 한다.

II. 시스템 모델

저궤도 위성 네트워크에서 위성 간 통신을 활용하여 그림 1과 같이 송신 게이트웨이 S와 수신 게이트웨이 D간의 데이터를 전송하고자 한다. 송신 게이트웨이와

* 이 논문은 중소기업벤처부의 지원으로 지원을 받아 수행 되었습니다 (S3373667).

◆ First Author : Pukyong National University, Department of Electronic Engineering, limbj@pknu.ac.kr, 정회원

° Corresponding Author : Korea University, School of Electrical Engineering, koyc@korea.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 202502-041-B-LU, Received February 23, 2025; Revised March 18, 2025; Accepted March 18, 2025

수신 케이트웨이가 존재하며 저궤도 위성은 decode-and-forward (DF) 릴레이의 역할을 담당하여 다음 흡에 데이터를 전달하고자 한다. 우주에 $H+1$ 개의 저궤도 위성이 설치되어 있고 각 저궤도 위성 간에는 무선 광통신 링크가 형성되어 있다. 그럼 1에서 h 번째 위성은 R_h 로 표기하였다. 여기서 위성 간 통신으로는 무선 광통신을 활용하며 위성 및 지상 케이트웨이 간에는 RF 통신을 활용한다. 따라서 RF 링크 및 FSO 링크의 신호는 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$\begin{aligned} y^{RF} &= h^{RF}x + n^{RF} \\ y^{FSO} &= \eta h^{FSO} + n^{FSO} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 η 는 광-전자 변환율을 의미하며, h^{RF} 와 h^{FSO} 는 RF 링크와 FSO 링크의 무선 채널을 나타낸다.

RF 링크를 위해 직진파를 포함하는 Rician 채널 모델을 사용하며 RF 링크의 signal-to-noise ratio (SNR)의 PDF는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f_{\gamma_{RF}}(\gamma) = \frac{K+1}{\bar{\gamma}_{RF}} I_0(2\sqrt{\frac{K(K+1)\gamma}{\bar{\gamma}_{RF}}}) \exp\left(-\frac{(K+1)\gamma}{\bar{\gamma}_{RF}} - K\right) \quad (2)$$

여기서 K 는 Rician 계수이며, $\bar{\gamma}_{RF}$ 는 RF 링크의 평균 SNR이다. RF 링크와 다르게 FSO 링크의 채널은 다르게 모델링되며, 포인팅 에러가 채널에 포함되어 모델링된다. 이는 송신단과 수신단의 빔이 정렬되지 않아서 발생하는 문제로 포인팅 에러가 발생하게 되면 수신 파워가 저하되는 문제가 발생한다. 이러한 포인팅 에러는 다음과 같이 모델링한다^[6].

$$h_p = A_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{w_{Zeq}^2}\right) \quad (3)$$

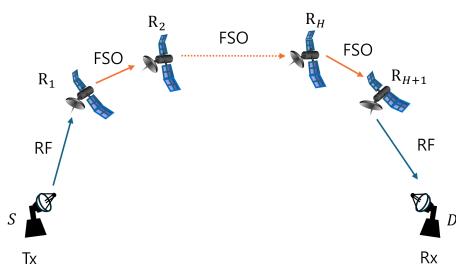


그림 1. 다중흡 저궤도 위성 네트워크 모델
Fig. 1. System model of multi-hop LEO satellite netowrk

여기서 r 은 수신 렌즈 중심과 수신 빔의 footprint의 중심간 거리를 나타내며 $r = \sqrt{r_x + r_y}$ 로 모델링되고 r_x 와 r_y 는 σ 의 표준편차를 가지는 가우시안 분포로 모델링할 수 있다. A_0 는 $r = 0$ 일 때 수신되는 파워를 나타낸다. 또한 $w_{z_{eq}}$ 는 송수신 거리 z_{eq} 에서의 빔 waist를 나타낸다. 결과적으로 포인팅 에러를 반영한 FSO 링크의 수신 SNR의 PDF는 다음과 같이 모델링한다^[6].

$$\begin{aligned} f_{FSO}(\gamma) &= \frac{\epsilon^2}{4} \left(\frac{\epsilon^2}{1+\epsilon^2} \right)^{\epsilon^2} \exp(2\sigma_X^2 \epsilon^2 (1+\epsilon^2)) \\ &\times \text{erfc}\left(\frac{\ln\left(\frac{\epsilon^2}{1+\epsilon^2} \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{FSO}}} + 2\sigma_X^2 (1+2\epsilon^2)\right)}{\sqrt{8\sigma_X^2}}\right) \bar{\gamma}_{FSO}^{-\frac{\epsilon^2}{2}} \gamma^{\frac{\epsilon^2}{2}-1} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $\bar{\gamma}_{FSO}$ 는 FSO 링크의 평균 SNR이며 $\epsilon = \frac{w_{Zeq}}{\sigma}$ 이다.

III. ISL 기반 LEO 위성 네트워크의 성능 분석

본 장에서는 FSO 기반의 다중흡 위성 간 링크에서 종단 간 SNR을 분석하고 이를 활용하여 아웃티지 및 통신 지연 성능에 분석하고자 한다.

다중흡 링크에서 종단간 SNR은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\gamma_{eq} = \min(\gamma_S^{RF}, \gamma_1^{FSO}, \gamma_2^{FSO}, \dots, \gamma_H^{FSO}, \gamma_{H+1}^{RF}) \quad (5)$$

여기서 γ_S^{RF} 와 γ_{H+1}^{RF} 는 각각 소스 케이트웨이와 저궤도 위성 간 링크 그리고 저궤도 위성과 목적지 케이트웨이 간 SNR을 나타내며 RF 통신을 사용한다. 반면 γ_h^{FSO} 는 h 번째 저궤도 위성에서 다음 위성 간 SNR을 나타내며 FSO 통신을 사용한다. 다중흡 시스템에서 하나의 흡에서 아웃티지가 발생하게 되면 종단간 아웃티지가 발생하게 된다. 따라서 종단간 아웃티지 발생 확률은 다음과 같이 정의된다.

$$P_{out} = \Pr(\gamma_{eq} \leq \gamma_{th}) = 1 - (1 - F_{\gamma_{RF}}(\gamma_{th}))^2 (1 - F_{\gamma_{FSO}}(\gamma_{th}))^H \quad (6)$$

여기서 $F_{\gamma_{RF}}(\gamma)$ 와 $F_{\gamma_{FSO}}(\gamma)$ 는 RF 링크와 FSO 링크의 CDF를 나타나며, 수식 (2)와 (4)를 통해 유도할 수 있다. 또한 γ_{th} 는 아웃티지의 threshold를 나타낸다. 수식

(6)에서 FSO 링크의 CDF 수식을 RF 링크의 수식으로 변환한다면 RF 기반 위성 간 통신 시스템의 아웃타지 확률을 분석할 수 있다.

저궤도 위성 네트워크에서 종단 간 지연 시간은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$T_{Tot} = (T_S^{\text{Prop}} + \sum_{h=1}^{H+1} T_h^{\text{Prop}}) + (T_S^{\text{Trans}} + \sum_{h=1}^{H+1} T_h^{\text{Trans}}) + (H+1) T_{Sat} \quad (7)$$

여기서 T_S^{Prop} 와 T_h^{Prop} 는 소스 게이트웨이와 h 번째 흡에서 다음 흡까지의 전파 지연을 나타나며, T_S^{Trans} 와 T_h^{Trans} 는 전송 지연을 나타낸다. 또한 T_{Sat} 는 각 위성 노드에서 소요되는 처리 시간을 나타낸다. 이를 통해 다중흡 시스템에서 종단간 지연 시간을 분석할 수 있다.

IV. 시뮬레이션

본 장에서는 위성 간 통신에서 다중흡이 미치는 영향을 분석하고, FSO 링크와 RF 링크 기반의 위성 간 통신 성능을 비교하고자 한다. 시뮬레이션 환경으로, RF 및 FSO 링크의 수신 평균 SNR은 $\bar{\gamma}_{RF} = \bar{\gamma}_{FSO} = 5 \text{ [dB]}$ 이며 RF 링크에서 $K = 6 \text{ [dB]}$ 의 Rician 계수를 사용한다. RF 시스템의 대역폭은 1GHz를 사용하며 FSO 시스템의 대역폭은 100GHz를 사용한다^[5]. 또한 송신단과 수신단 거리는 2000km 떨어져 있으며 저궤도 위성은 550km 고도에 배치되어 있다. 이때 위성이 2개가 배치되면 각각 송신단과 수신단 위에 배치되며, 위성간 거리는 2000km가 된다. 흡을 추가할 경우 균등한 위성간 거리를 가지도록 배치한다. 또한 수식 (3)에서 r_x 와 r_y 는 $\sigma = 50 \text{ [cm]}$ 의 표준편차를 가지는 가우시안 분포를 따른다.

그림 2는 위성 개수에 따른 아웃타지 확률 성능 그래프이다. 아웃타지 성능은 γ_{th} 에 따라 성능이 결정되며, γ_{th} 가 낮은 값일수록 낮은 아웃타지 확률을 보여준다. FSO 기반 ISL과 RF 기반 ISL을 비교하였을 때, FSO 기반 ISL이 낮은 아웃타지 성능을 보인다. FSO 링크가 RF 링크 대비 안정적으로 송수신이 가능하여 우주 환경에서 손실이 더 적기 때문이다. 또한 FSO 기반 ISL은 위성을 3개 거치게 되면 그 이상은 아웃타지 확률이 일정한 현상을 보여준다. ISL을 FSO 통신으로 대체하더라도 지상 게이트웨이와 위성 간에는 RF 통신을 사용하기 때문에 위성 개수가 늘어나도 성능이 더 개선되지

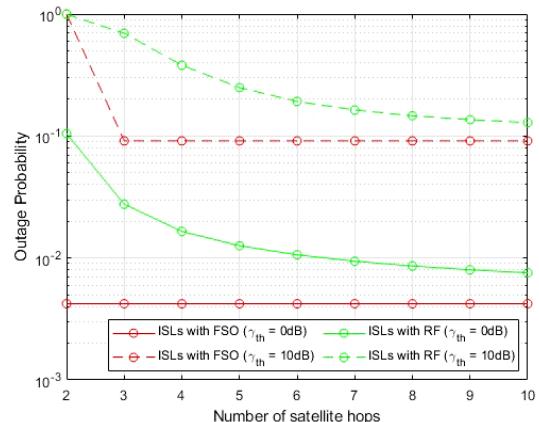


그림 2. 위성 개수에 따른 아웃타지 확률 성능
Fig. 2. Outage probability versus the number of satellites

지 않는다. 따라서 위성 개수가 무한대가 되면 지상-위성 간 RF 링크로 인해 RF 기반 ISL과 FSO 기반 ISL은 같은 성능으로 수렴할 것이다.

그림 3에서는 종단간 지연 시간을 보여주며, 100Mbyte의 패킷을 전달할 때의 지연 시간을 보여준다. 또한 각 위성에서 처리 시간은 10ms로 계산하였다^[7]. FSO의 경우 RF 대비 더 넓은 대역폭을 사용할 수 있으며 ISL에서 초광대역 전송이 가능해지므로 ISL에서 지연 시간이 감소하게 된다. 하지만 지상 게이트웨이와 위성 간 링크는 RF 통신을 사용하므로 RF 기반 ISL 대비 지연 시간이 크게 개선되지 않는다. 또한 흡을 증가시킬수록 지연 시간이 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 각 위성은 DF 릴레이의 역할을 하게 되므로 흡 수가 증가할수록 데이터 전달 시 필요한 지연 시간이 축적되어 종단간 지연 시간이 증가하게 된다. 하지만 위성 개

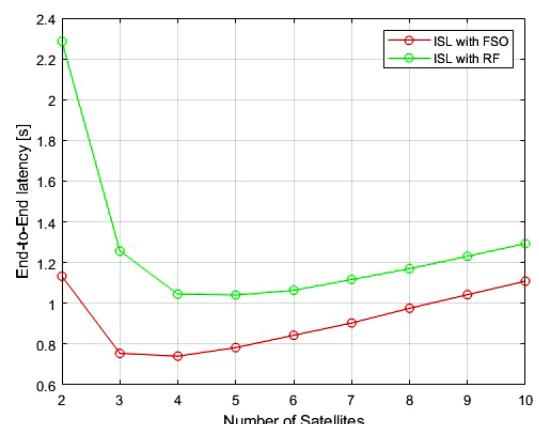


그림 3. 위성 개수에 따른 지연 시간 성능
Fig. 3. End-to-end latency versus the number of satellites

수가 4개 일 경우, FSO 기반 ISL은 최소의 지연 시간을 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있다. 위성 개수를 늘리게 되면 위성 간 거리가 짧아지게 되고 더 높은 속도로 송수신이 가능해지므로 위성 간 전송에서 전송 지연을 크게 줄일 수 있다. 하지만 위성 개수가 계속 늘어나게 되면 위성에서 처리 시간이 늘어나 결과적으로 종단간 지연 시간은 늘어나게 된다. 따라서 지연 시간을 최소화하고 아웃티지 확률을 최소화할 수 있는 위성 개수를 정해야하며, 본 논문의 시뮬레이션 환경에서는 위성 3개 혹은 4개를 설치하여 최적의 성능을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 4는 $r_{th} = 0$ [dB] 일 때 FSO에서 발생하는 포인팅 에러의 영향에 따른 아웃티지 성능을 보여준다. 포인팅 에러가 작은 환경에서는 RF 기반 ISL 대비 FSO 기반 ISL의 성능이 좋지만 포인팅 에러가 심각한 환경에서는 반대로 RF 기반 ISL의 성능이 우수하다. FSO 통신 성능은 포인팅 에러에 민감하기 때문에 포인팅 에러가 적은 환경에서 사용해야만 FSO 통신의 이득을 얻을 수 있으며 FSO 통신을 위해 정밀한 포인팅 기술이 필수적임을 확인할 수 있다.

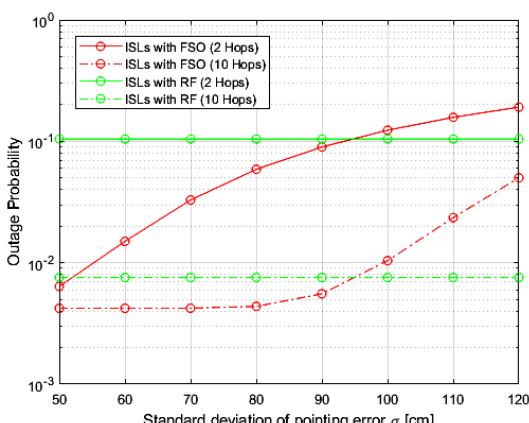


그림 4. 포인팅 에러에 따른 아웃티지 성능 비교
Fig. 4. Outage probability with respect to the effect of pointing error

V. 결 론

본 논문에서는 ISL을 활용한 디중홀 저궤도 위성 네트워크의 성능을 분석하였고, ISL에 무선 광통신 기술을 적용하였을 때 얻을 수 있는 이득에 대해 분석하였다. 특히, 저궤도 위성 네트워크에서 디중홀에 따른 아웃티지 확률과 종단간 지연 시간을 분석하였고, 시뮬레이션을 통해 FSO 기반 ISL과 RF 기반 ISL 대비 성능을

개선할 수 있음을 보여주었다. 또한 위성 개수에 따른 아웃티지 확률 및 지연 시간을 분석함으로써 최적의 위성 개수에 대해 논의하였다.

References

- [1] N. Pachler, I. del Portillo, E. F. Crawley, and B. G. Cameron, "An updated comparison of four low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband," in *Proc. ICC Wkshp.*, pp. 1-7, Jun. 2021.
- [2] A. U. Chaudhry and H. Yanikomeroglu, "Laser intersatellite links in a starlink constellation: A classification and analysis," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 16, no. 2, pp. 48-56, Jun. 2021.
- [3] Q. Chen, L. Yang, X. Liu, B. Cheng, J. Guo, and X. Li, "Modeling and analysis of inter-satellite link in LEO satellite networks," in *Proc IEEE Int. Conf. Commun. Softw. Netw.*, pp. 134-138, 2021.
- [4] J.-H. Lee, J. Park, M. Bennis, and Y.-C. Ko, "Integrating LEO satellites and multi-UAV reinforcement learning for hybrid FSO/RF non-terrestrial networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 3, pp. 3647-3662, Mar. 2023.
- [5] J.-H. Lee, K.-H. Park, Y.-C. Ko, and M.-S. Alouini, "Spectral-efficient network design for high-altitude platform station networks with mixed RF/FSO system," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 21, no. 9, pp. 7072-7087, Sep. 2022.
- [6] K.-J. Jung, S. S. Nam, M.-S. Alouini, and Y.-C. Ko, "Unified finite series approximation of FSO performance over strong turbulence combined with various pointing error conditions," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 10, pp. 6413-6425, Oct. 2020.
- [7] J. Liang, et al., "Free-space optical (FSO) satellite networks performance analysis: Transmission power, latency, and outage probability," in *IEEE Open J. Veh. Technol.*, vol. 5, pp. 244-261, 2024.